

P759US

44319-056

Abe

December 27, 2000

日 本 国 特 許 庁

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

McDermott, Will & Emery



別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日

Date of Application:

1999年12月27日

出 願 番 号

Application Number:

平成11年特許願第371265号

出 願 人

Applicant (s):

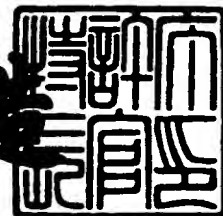
ミノルタ株式会社

CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT

2000年 9月 1日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

及 川 耕 造



出証番号 出証特2000-3069355

【書類名】 特許願

【整理番号】 26127

【提出日】 平成11年12月27日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G01B 11/22

【発明の名称】 三次元形状データのデータ削減方法及びデータ削減装置

【請求項の数】 10

【発明者】

 【住所又は居所】 大阪府中央区安土町二丁目 3 番 1 3 号 大阪国際ビル
ミノルタ株式会社内

 【氏名】 阿部 芳久

【特許出願人】

 【識別番号】 000006079

 【住所又は居所】 大阪府中央区安土町二丁目 3 番 1 3 号 大阪国際ビル

 【氏名又は名称】 ミノルタ株式会社

【代理人】

 【識別番号】 100067828

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 小谷 悦司

【選任した代理人】

 【識別番号】 100075409

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 植木 久一

【選任した代理人】

 【識別番号】 100096150

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 伊藤 孝夫

【手数料の表示】

 【予納台帳番号】 012472

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9716118

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 三次元形状データのデータ削減方法及びデータ削減装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 2 個以上の格子点を 1 個の格子点に集結してポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより当該ポリゴンモデルを構成する複数の三次元形状データのデータ数を削減する三次元形状データのデータ削減方法であって、上記ポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより変形を受ける全ての面について、各面と各面の変形に関与した全ての最初の格子点との距離に基づく所定の評価値を算出する第 1 の工程と、上記評価値を予め設定された許容値と比較する第 2 の工程と、上記評価値が上記許容値以下であるとき、上記エッジもしくは面の収縮を行って上記三次元形状データの削減を行う第 3 の工程とからなる三次元形状データのデータ削減方法。

【請求項 2】 上記評価値は、下記 (1) 式で定義される誤差 ε であることを特徴とする請求項 1 記載の三次元形状データのデータ削減方法。

【数 1】

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^T \cdot \sum_{j=1}^{m_i} K v_j \cdot P_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \dots (1)$$

但し、 P_i : 変形を受ける面 p_i の平面方程式の列ベクトル表記

P_i^T : P_i の転置行列

$K v_j$: 面 p_i の変形に関与した最初の格子点 v の三次元形状データについて誤差行列 $K v = V \cdot V^T$ (V は三次元形状データの列ベクトル表記) を定義すると、面 p_i の変形に関与した j 番目の格子点 v_j の誤差行列

m_i : i 番目の面 p_i の変形にのみ関与した格子点 v_j の誤差行列 $K v_j$ の総数

n : 変形を受ける面 p_i の総数

【請求項 3】 2 個以上の格子点を 1 個の格子点に集結してポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより当該ポリゴンモデルを構成する複数の

三次元座標データのデータ数を削減する三次元形状データのデータ削減装置であって、上記ポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより変形を受ける全ての面について、各面と各面の変形に関与した全ての最初の格子点との距離に基づく所定の評価値を算出する評価値算出手段と、上記評価値を予め設定された許容値と比較する比較手段と、上記評価値が上記許容値以下であるとき、上記エッジもしくは面の収縮を行って上記三次元形状データの削減を行うデータ削減手段とを備えたことを特徴とする三次元形状データのデータ削減装置。

【請求項 4】 上記評価値算出手段は、下記（１）式で定義される誤差 ε を評価値として算出するものであることを特徴とする請求項 3 記載の三次元形状データのデータ削減装置。

【数 2】

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^T \cdot \sum_{j=1}^{m_i} K v_j \cdot P_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \dots (1)$$

但し、 P_i : 変形を受ける面 p_i の平面方程式の列ベクトル表記

P_i^T : P_i の転置行列

$K v_j$: 面 p_i の変形に関与した最初の格子点 v の三次元形状データについて誤差行列 $K v = V \cdot V^T$ (V は三次元形状データの列ベクトル表記) を定義すると、面 p_i の変形に関与した j 番目の格子点 v_j の誤差行列

m_i : i 番目の面 p_i の変形にのみ関与した格子点 v_j の誤差行列

$K v_j$ の総数

n : 変形を受ける面 p_i の総数

【請求項 5】 上記評価値算出手段は、最初のポリゴンモデルを構成する全ての格子点 v についてそれぞれ誤差行列 $K v$ を算出しておき、2 個以上の格子点 v_p ($p = 1, 2, \dots$) を 1 の格子点 v_q に集結したときは、集結させた各格子点 v_p の誤差行列 $K v_p$ の和をその格子点 v_q の誤差行列 $K v_q$ として上記（１）式により誤差 ε を算出するものであることを特徴とする請求項 4 記載の三次元形状データのデータ削減装置。

【請求項 6】 上記評価値算出手段は、最初の格子点についてそれぞれ算出した誤差行列の対角元素とこの対角元素よりも上側の元素のみを記憶手段に記憶しておき、この記憶手段に記憶された対角元素とこの対角元素より上側の元素とを用いて誤差行列を復元し、この誤差行列を用いて上記（1）式により誤差 ε を算出することを特徴とする請求項 5 記載の三次元形状データのデータ削減装置。

【請求項 7】 上記評価値算出手段は、最初の格子点の三次元形状データの列ベクトル V が下記（2）式で表されるとき、各面 p_i 毎に算出される誤差行列 $\Sigma K v_j$ ($j = 1, 2, \dots, m_i$) の右下隅の元素を加算することで上記（1）式の総数 Σm_i ($i = 1, 2, \dots, n$) を算出することを特徴とする請求項 4 記載の三次元形状データのデータ削減装置。

【数 3】

$$V = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

【請求項 8】 上記評価値算出手段は、上記格子点 v_j の誤差行列 $K v_j$ に代えて重み付誤差行列 $w_j \cdot K v_j$ を用いて上記（1）式により誤差 ε を算出することを特徴とする請求項 4 記載の三次元形状データのデータ削減装置。

【請求項 9】 上記ポリゴンモデルのエッジ収縮もしくは面収縮に関与する格子点は、三角形ポリゴンモデルのエッジもしくは面を構成する格子点であることを特徴とする請求項 1 記載の三次元形状データのデータ削減装置。

【請求項 10】 2 個以上の格子点を 1 個の格子点に集結することにより変形を受ける三角形の面を構成する格子点は、データ削減後の三角形ポリゴンモデルの面を構成する格子点であることを特徴とする請求項 1 記載の三次元形状データのデータ削減方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、ポリゴンモデルを構成する三次元形状データのデータ削減方法及びその方法を用いたデータ削減装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

例えば空間分解能の極めて高い三次元形状計測装置で得られる描画品質の高い計測データはデータ数が膨大であるため、必要以上の描画品質を備えている場合は、その後の処理において記憶装置への負担が大きく、処理速度も著しく低下するという問題が生じる。このため、計測データのデータ数を削減して上記問題をできる限り低減することが必要となるが、この場合、データ削減後の計測データで構成されるポリゴンモデル（すなわち、近似化されたポリゴンモデル）と実測された三次元形状データで構成されるポリゴンモデル（以下、最初のポリゴンモデルという。）との相違が大きすぎると、データ削減後の計測データを有効に活用することができなくなるので、データ削減処理においては、近似化されたポリゴンモデルと最初のポリゴンモデルとの誤差を管理する必要がある。

【0003】

特に三次元形状計測装置で得られた三次元形状データの場合、実測された三次元形状データがデータ削減処理によって近似値に変換されるので、最初のポリゴンモデルと近似化されたポリゴンモデルとの誤差管理は、実測された三次元形状データを基準に行うことが好ましい。

【0004】

その一方、従来、三角形ポリゴンモデルにおいて、所望の許容誤差範囲内でモデルの近似化を図ることにより当該三角形ポリゴンモデルを構成する三次元形状データのデータ数を削減する方法が種々提案されている。

【0005】

例えば論文「3次元ポリゴンモデルの階層的近似」（堀川，戸塚、Proceedings of the 5th Sony Research Forum, pp3-7, 1995）には、三角形ポリゴンモデルを構成する各エッジのモデル形状への寄与を当該エッジを除去した場合に変化する体積を表す評価関数で評価し、例えばエッジと周辺の面とが平行である場合や面が小さい場合やエッジが短い場合等の評価値が小さいエッジを除去す

ることで、三次元形状データのデータ数を削減する方法が示されている。

【0006】

また、論文「Simplification Envelopes」(Cohen Jonathan, Amitabh Vars hney, Dinesh Manocha, Greg Turk, Hans Weber, Pankai Agarwal, Frederi ck Brooks and William Wright. Proceedings of SIGGRAPH 96 In Com puter Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1996, ACM SIG GRAPH, pp. 119-128) には、最初のポリゴンモデルを誤差 ε で縮小したモデルと 誤差 ε で拡大したモデルとを作成し、最初のポリゴンモデルを近似化したポリゴ ンモデルが拡大／縮小した両モデルの間に入るように最初のポリゴンモデルのデ ータ数を削減する方法が示されている。

【0007】

また、論文「Surface Simplification Using Quadric Error Metrics」 (Michael Garland and Paul S. Heckbert. Carnegie Mellon University Proceedings of SIGGRAPH 97. 1997) には、例えば三角形ポリゴンモデルの エッジ又は面を構成する2個以上の格子点(三次元形状データ)を1個の格子点 (三次元形状データ)に集結することにより三角形ポリゴンモデルを構成する三 次元形状データのデータ数を削減する方法として、エッジ収縮もしくは面収縮に より集結される格子点とエッジ収縮もしくは面収縮により影響を受けた最初の三 角形ポリゴンモデルを構成する各平面との距離の離れ具合をデータ削減処理にお ける誤差として管理し、この誤差が所定の許容誤差範囲内であるエッジ収縮もし くは面収縮の処理のみを行うことで、所定の許容誤差範囲内でデータ数の削減を 行う方法が示されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】

上記論文「3次元ポリゴンモデルの階層的近似」に示されるデータ削減方法は 評価値によってエッジを除去するだけであるので、ポリゴンモデルの特徴的な部 分の三次元データは残るものの、エッジ除去によるモデルの近似化における誤差 を評価することはできない。従って、CG (Computer Graphics) におけるVR (Virtual Reality) やゲーム等のように、単に三次元画像を表示するためにポ

リゴンモデルのデータ数を削減する場合には有効であるが、三次元形状計測装置で得られた計測データのように、最初の計測データとデータ削減後の近似モデルのデータとの誤差管理を必要とする場合には有効な方法となり得ない。

【0009】

一方、上記論文「Simplification Envelopes」に示されるデータ削減方法は、厳密な誤差管理は可能であるが、データ削減処理の過程で誤差 ε で拡大及び縮小したポリゴンモデルを作成し、それらのポリゴンモデルのデータを保持する必要があるので、処理に係るデータ数が膨大となり、メモリ容量やデータ削減のための演算処理の負担が大きいという問題がある。

【0010】

また、上記論文「Surface Simplification Using Quadric Error Metrics」に示されるデータ削減方法は、最初のポリゴンモデルを構成する面に対する近似後のポリゴンモデルを構成する格子点の離れ具合を誤差として管理しているため、三次元形状計測装置の計測データのように最初のポリゴンモデルを構成する格子点に対して近似後のポリゴンモデルの誤差を管理してデータ削減を行いたい場合には必ずしも適切な方法とはいえない。

【0011】

また、三次元形状計測装置で測定対象物の粗い面や切削された面を測定して得られた計測データの場合、例えばポリゴンモデルにおいて局所的に面の向きがジグザグに急変するような場合、それらのジグザグな面に対する誤差を評価することになるので、データの削減が進むにつれて誤差が大きく評価され、データ削減が十分に行なわれないという問題がある。

【0012】

本発明は、上記課題に鑑みてなされたものであり、三次元形状計測装置で得られた計測データに対して正確な誤差評価に基づき適正にデータ削減が可能な三次元形状データのデータ削減方法及びそのデータ削減方法を用いたデータ削減装置を提供するものである。

【0013】

【課題を解決するための手段】

請求項 1 記載の発明は、2 個以上の格子点を 1 個の格子点に集結してポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより当該ポリゴンモデルを構成する複数の三次元形状データのデータ数を削減する三次元形状データのデータ削減方法であって、上記ポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより変形を受ける全ての面について、各面と各面の変形に関与した全ての最初の格子点との距離に基づく所定の評価値を算出する第 1 の工程と、上記評価値を予め設定された許容値と比較する第 2 の工程と、上記評価値が上記許容値以下であるとき、上記エッジもしくは面の収縮を行って上記三次元形状データの削減を行う第 3 の工程とからなるものである。

【0014】

また、請求項 2 記載の発明は、2 個以上の格子点を 1 個の格子点に集結してポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより当該ポリゴンモデルを構成する複数の三次元座標データのデータ数を削減する三次元形状データのデータ削減装置であって、上記ポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより変形を受ける全ての面について、各面と各面の変形に関与した全ての最初の格子点との距離に基づく所定の評価値を算出する評価値算出手段と、上記評価値を予め設定された許容値と比較する比較手段と、上記評価値が上記許容値以下であるとき、上記エッジもしくは面の収縮を行って上記三次元形状データの削減を行うデータ削減手段とを備えたものである。

【0015】

上記構成によれば、ポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより変形を受ける全ての面について、各面と各面の変形に関与した全ての最初の格子点との距離に基づく所定の評価値が算出され、この評価値は予め設定された許容値と比較される。そして、その評価値が許容値以下であるとき、そのエッジもしくは面の収縮を行ってポリゴンモデルを構成する三次元形状データが削減される。

【0016】

なお、上記評価値は、下記 (1) 式で定義する誤差 ε とするとよい (請求項 2, 4)。

【0 0 1 7】

【数 4】

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^T \cdot \sum_{j=1}^{m_i} K v_j \cdot P_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \dots (1)$$

但し、 P_i : 変形を受ける面 p_i の平面方程式の列ベクトル表記

P_i^T : P_i の転置行列

$K v_j$: 面 p_i の変形に関与した最初の格子点 v の三次元形状

データについて誤差行列 $K v = V \cdot V^T$ (V は三次元形状

データの列ベクトル表記)を定義すると、面 p_i の変形に

関与した j 番目の格子点 v_j の誤差行列

m_i : i 番目の面 p_i の変形にのみ関与した格子点 v_j の誤差行列

$K v_j$ の総数

n : 変形を受ける面 p_i の総数

【0 0 1 8】

この構成によれば、ポリゴンモデルを構成するエッジもしくは面について、(1)式で定義される誤差 ε が当該エッジもしくは面の収縮の可否を判定する評価値として算出され、その誤差 ε が所定の許容値以下であるとき、当該エッジもしくは面を収縮させてポリゴンモデルを構成する格子点(三次元形状データ)が削減される。

【0 0 1 9】

ここに、(1)式における分母は、ポリゴンモデルを構成する面のうち、エッジ収縮もしくは面収縮により変形を受ける全ての面についての、当該面と当該面の変形に関与した最初の格子点との距離の2乗和を示し、(1)式の分子は、分母の距離の2乗和の項の総数を示している。従って、誤差 ε は、エッジ収縮もしくは面収縮により変形を受ける面が当該面の変形に関与した最初の格子点からどの程度離れているかを示す離れ具合(距離の2乗)の平均値を示している。

【0 0 2 0】

また、請求項5記載の発明は、請求項4記載の三次元形状のデータ削減装置に

において、上記評価値算出手段は、最初のポリゴンモデルを構成する全ての格子点 v についてそれぞれ誤差行列 K_v を算出しておき、2 個以上の格子点 v_p ($p = 1, 2, \dots$) を 1 の格子点 v_q に集結したときは、集結させた各格子点 v_p の誤差行列 K_{v_p} の和をその格子点 v_q の誤差行列 K_{v_q} として上記 (1) 式により誤差 ε を算出するものである。

【0021】

上記構成によれば、データ削減処理に際し、最初のポリゴンモデルを構成する全ての格子点 v についてそれぞれ誤差行列 K_v が算出され、エッジ収縮処理もしくは面収縮処理により 2 個以上の格子点 v_p ($p = 1, 2, \dots$) が 1 の格子点 v_q に集結されたときは、次のエッジ収縮もしくは面収縮でこの格子点 v_q を集結させる際、格子点 v_q に集結させた各格子点 v_p の誤差行列 K_{v_p} の和がその格子点 v_q の誤差行列 K_{v_q} ($= \sum K_{v_p}$) として算出され、この誤差行列 K_{v_q} を用いて上記 (1) 式により誤差 ε が算出される。

【0022】

集結後の格子点の誤差行列は、最初の格子点の誤差行列を加算することで算出されるので、演算が容易となる。また、最終的に各格子点について当該エッジ収縮もしくは面収縮で関係した最初の格子点の誤差行列の和を対応付けることで、誤差評価を行うことができる。

【0023】

また、請求項 6 記載の発明は、請求項 5 記載の三次元形状のデータ削減装置において、上記評価値算出手段は、最初の格子点についてそれぞれ算出した誤差行列の対角元素とこの対角元素よりも上側の元素のみを記憶手段に記憶しておき、この記憶手段に記憶された対角元素とこの対角元素より上側の元素とを用いて誤差行列を復元し、この誤差行列を用いて上記 (1) 式により誤差 ε を算出するものである。

【0024】

上記構成によれば、最初の格子点についてそれぞれ算出された誤差行列は対称行列となり、その誤差行列の対角元素とその対角元素の上側の元素が記憶されるので、メモリの低減に寄与する。

【0 0 2 5】

また、請求項 7 記載の発明は、請求項 4 記載の三次元形状のデータ削減装置において、上記評価値算出手段は、最初の格子点の三次元形状データの列ベクトル V が下記 (2) 式で表されるとき、各面 p_i 毎に算出される誤差行列 $\Sigma K v_j$ ($j = 1, 2, \dots, m_i$) の右下隅の元素を加算することで上記 (1) 式の総数 Σm_i ($i = 1, 2, \dots, n$) を算出するものである。

【0 0 2 6】

【数 5】

$$V = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

【0 0 2 7】

上記構成によれば、格子点 v の三次元形状データの列ベクトル V が (2) 式で表されるとき、この格子点 v の誤差行列 $K v$ は下記 (A) 式のようになり、右下隅の元素は常に「1」となる。従って、 $\Sigma K v_j$ の総数は各誤差行列 $K v_j$ の右下隅の元素の総和となるので、これを演算することで別途総和を演算する必要がない。

【0 0 2 8】

【数 6】

$$K v_j = V \cdot V^T = \begin{bmatrix} x_j^2 & x_j y_j & x_j z_j & x_j \\ x_j y_j & y_j^2 & y_j z_j & y_j \\ x_j z_j & y_j z_j & z_j^2 & z_j \\ x_j & y_j & z_j & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (A)$$

【0 0 2 9】

また、請求項 8 記載の発明は、請求項 4 記載の三次元形状データのデータ削減装置において、上記評価値算出手段は、上記格子点 v_j の誤差行列 $K v_j$ に代えて

重み付誤差行列 $w_j \cdot K v_j$ を用いて上記 (1) 式により誤差 ε を算出するものである。

【0030】

上記構成によれば、誤差 ε は、格子点 v_j の誤差行列 $K v_j$ に代えて重み付誤差行列 $w_j \cdot K v_j$ を用いて上記 (1) 式により算出される。

【0031】

【発明の実施の形態】

図 1 は、本発明に係るデータ削減方法を適用した三次元形状計測データの処理システムのブロック構成図である。

【0032】

同図に示す三次元形状計測データの処理システム（以下、形状データ処理システムという。）は、被測定物 G の三次元形状データを計測する三次元形状計測装置 1、三次元形状計測装置 1 で計測された三次元形状データを記憶する外部記憶装置 2、三次元形状計測装置 1 で計測された三次元形状データを本発明に係るデータ削減方法を用いて削減し、所定のデータ処理を行う形状データ処理装置 3、形状データ処理装置 3 で処理された三次元形状データを記憶する外部記憶装置 4、データ削減後の三次元形状データを用いて、例えばポリゴンモデル等の測定物 G の三次元形状画像を表示する表示装置 5 及び形状データ処理装置 3 で処理された三次元形状データが利用される CAD/CAM (computer aided design and computer aided manufacturing) 等の外部処理装置 6 から構成されている。

【0033】

三次元形状計測装置 1 は共役オートフォーカスシステムを用いて測定対象物 G の表面形状の計測を行うものである。三次元形状計測装置 1 は、図 2 に示すように、照明光を発生する照明部 101、照明部 101 からの照明光を測定対象物 G に照射するとともに、測定対象物 G で反射した照明光を受光部 103 に導く共焦点型光学系 102、測定対象物 G を反射した照明光を受光し、電気信号に光電変換して出力する受光部 103、この共焦点型光学系 102（以下、光学系 102 と呼ぶ。）を透過した測定対象物 G からの反射光を分光して受光部 103 に導くビームスプリッタ 104 及び受光部 103 から出力される受光信号を用いて測定

対象物Gの表面の位置座標を算出する演算部105からなる基本構成を有している。

【0034】

測定対象物Gの三次元形状は当該測定対象物Gを三次元形状装置1の前方に配置された測定テーブル106に載置し、当該測定テーブル106を高さ方向に所定のピッチで昇降させつつ、各高さ位置で測定対象物Gの表面の凹凸を計測することにより行なわれる。すなわち、測定対象物Gの高さ方向をY方向、光学系102の光軸方向をZ方向、Y方向及びZ方向に直交する方向をX方向とすると、測定対象物GのY座標を所定のピッチで変化させつつ、各Y座標の位置で測定対象物GのZ座標を計測することにより測定対象物Gの三次元形状が計測される。そして、三次元形状計測装置1で計測された測定対象物Gの三次元形状データ(x, y, z)は形状データ処理装置3に入力される。

【0035】

なお、三次元計測装置1はX軸と平行に配置されたラインセンサからなる光電変換素子103aを備え、この光電変換素子103aの各画素毎（各画素位置がX座標に相当）にその受光信号を用いて測定対象物Gの表面の位置座標（Z座標）を計測するようになっている。このため、光電変換素子103a全体に測定対象物Gからの反射光が入射されるように、照明部101からはX方向に延びるスリット状の照明光が発光される。

【0036】

測定対象物GのZ座標は以下のように計測される。まず、光学系102の像側の焦点位置に配置された照明部101からX方向に延びるスリット状の照明光を発光させる。この照明光は光学系102の物体側の焦点位置に集光され、その焦点位置にX方向に延びるライン光が形成される。次に、この状態で光学系102の物体側の焦点位置（すなわち、ライン光）を光軸方向に当該焦点位置が測定対象物Gの内部に至るまで移動させつつ、所定の周期で光電変換素子103aの露光を繰り返す。そして、各露光位置で受光された受光信号のレベルを用いて、演算部105で最大レベルとなる露光位置を光電変換素子103aの各画素毎に算出し、その位置を測定対象物Gの表面のZ座標とする。

【 0 0 3 7 】

形状データ処理装置 3 は、ポリゴン生成部 3 1、データ削減部 3 2、許容値入力部 3 3 及びデータ出力部 3 4 を備えている。ポリゴン生成部 3 1 は三次元形状計測装置 1 から入力された測定対象物 G の三次元形状データ (x, y, z) に基づいて測定対象物 G のポリゴンモデルを生成するものである。データ削減部 3 2 はポリゴンモデルのエッジ収縮もしくは面収縮により三次元形状データの削減を行うものである。すなわち、図 3 に示すように、計測データに基づく精密なポリゴンモデル A を所定の許容誤差範囲内でポリゴンモデル B に近似化するように、ポリゴンモデル A の格子点 (三次元形状データ) を適当に削減するものである。

【 0 0 3 8 】

データ削減部 3 2 は、後述するデータ削減処理を実行するため、評価値演算部 3 2 1、評価値ソート部 3 2 2 及びエッジ／面収縮処理部 3 2 3 を備えている。

【 0 0 3 9 】

評価値演算部 3 2 1 は、2 個以上の格子点を集結して 1 個の格子点に置換することによりポリゴンモデルを構成するエッジ又は面を収縮する (すなわち、ポリゴンモデルの近似化を図る) に当たり、各エッジ又は各面の収縮の可否を判定するための評価値を算出するものである。この評価値については後述する。

【 0 0 4 0 】

評価値ソート部 3 2 2 は評価値演算部 3 2 1 で各エッジ毎もしくは各面毎に算出された複数の評価値を小さい順もしくは大きい順に並べ替えることで最小の評価値を算出するものである。エッジ／面収縮処理部 3 2 3 は評価値ソート部 3 2 2 で算出された最小評価値を許容値入力部 3 3 から入力された許容値と比較し、許容値以下であるとき、その最小評価値に対応するエッジもしくは面の収縮処理を行うものである。なお、評価値及びエッジ収縮方法については後述する。

【 0 0 4 1 】

許容値入力部 3 3 は上述のようにエッジ収縮もしくは面収縮の可否を判定するための許容値を操作者が入力するためのものである。この許容値はポリゴンモデルを近似化するに当たり、エッジ収縮もしくは面収縮を行ってもポリゴンモデルの特徴部分への影響が少ないとされる許容範囲に相当し、操作者によって測定対

象物Gの形状に応じて適宜入力される。

【0042】

データ出力部34はデータを削減された三次元形状データ（近似化されたポリゴンモデルを構成する三次元形状データ）を外部記憶装置4、表示装置5、外部処理装置6に出力するインターフェースである。

【0043】

外部記憶装置4は磁気ディスク、光ディスク、磁気光ディスク等の外部記録媒体にデータを記録するもので、形状データ処理装置3から三次元形状データが入力されると、所定のファイル形式で外部記録媒体に記録する。

【0044】

表示装置5はブラウン管、液晶表示デバイス等の電子ディスプレイ装置からなる表示装置である。表示装置5に形状データ処理装置3から三次元形状データが入力されると、そのデータに基づいて近似化された測定対象物Gのポリゴンモデルの画像が表示される（図3のポリゴンモデルBを参照）。

【0045】

外部処理装置6は、例えば測定対象物Gの表面形状と略同一の形状を有する金型や模型を製作する装置である。外部処理装置6に形状データ処理装置3から三次元形状データが入力されると、その三次元形状データに基づいてワークが切削されて金型等が自動製作される。

【0046】

次に、本発明に係るデータ削減方法を説明する。

【0047】

図4はエッジ収縮によるデータ削減方法の概念図である。また、図5は面収縮によるデータ削減方法の概念図である。

【0048】

エッジ収縮によるデータ削減方法は、図4に示すようにポリゴンモデルが格子点 $v_1 \sim v_{10}$ で構成されている場合、例えば格子点 v_1 と格子点 v_2 とを結ぶエッジ E_{12} を収縮するように両格子点 v_1, v_2 を格子点 v_1' に集結させてデータ数を削減する方法である。

【0 0 4 9】

エッジ収縮によるデータ削減方法（以下、エッジ収縮法と略称する。）では、まず、全てのエッジ $E d_{ij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, 10$ 。但し、 $i \neq j$ で格子点が互いに隣接する組合わせ) についてエッジ収縮によるポリゴンモデルの形状変化への影響を評価する評価値を算出し、最小の評価値が許容値以下である場合にその評価値に対応するエッジ $E d_{ij}$ の両端の格子点 v_i, v_j を所定の格子点 v_i' に集結してデータの削減が行なわれる。

【0 0 5 0】

次に、格子点 v_i, v_j を格子点 v_i' に集結したポリゴンモデル（近似化されたポリゴンモデル）について同様の方法でエッジの収縮が行われ、更にデータの削減が行なわれる。そして、以下同様の方法でエッジ収縮後のポリゴンモデルにつきエッジ収縮ができなくなるまで1つずつエッジ収縮を行って（すなわち、最小評価値が許容値よりも大きくなるまでポリゴンモデルの近似化を繰り返して）、データの削減が行われる。

【0 0 5 1】

なお、格子点 v_i' は、上述した論文「3次元ポリゴンモデルの階層的近似」に示されるように、例えばエッジ $E d_{ij}$ の中点等の格子点 v_i, v_j 間の適所に設定される近似点である。

【0 0 5 2】

面収縮によるデータ削減方法（以下、面収縮法と略称する。）は、図5に示すようにポリゴンモデルが格子点 $v_1 \sim v_{11}$ で構成されている場合、例えば格子点 v_1 、格子点 v_2 及び格子点 v_3 で囲まれた面 P_{123} を除去するように格子点 v_1, v_2, v_3 を格子点 v_1' に集結させてデータ数を削減する方法である。

【0 0 5 3】

面収縮によるデータ削減方法も基本的にエッジ収縮によるデータ削減方法と同様の手順で行なわれる。すなわち、まず、全ての面 P_{ijk} ($i, j, k = 1, 2, \dots, 10$ 。但し、 $i \neq j \neq k$ で格子点が互いに隣接する組合わせ) について面収縮によるポリゴンモデルの形状変化への影響を評価する評価値を算出し、最小の評価値が許容値以下である場合にその評価値に対応する面 P_{ijk} を構成する格子

点 v_i , v_j , v_k を所定の格子点 v_i' に集結してデータの削減が行なわれ、以下同様の方法で面収縮後のポリゴンモデルにつき面収縮ができなくなるまで 1 つずつ面収縮を行ってデータの削減が行われる。

【0054】

エッジ収縮法もしくは面収縮法によって三次元形状データを順次削減した場合、データ削減処理後の被測定物 G を構成する三次元形状データは三次元形状計測装置 1 で実測された被測定物 G の三次元形状データとは異なり、近似された三次元形状データとなる。このため、実測された三次元形状データで構成されるポリゴンモデル（以下、最初のポリゴンモデルという。）に対するデータ削減後のポリゴンモデル（以下、近似化されたポリゴンモデルという。）の誤差を管理しながらデータ削減処理を行う必要がある。

【0055】

本実施形態に係るデータ削減方法では、例えばエッジ収縮を繰り返して、例えば図 6 に示すように格子点 a, b, c（実測された三次元形状データ）がそれぞれ格子点 a' , b' , c' に近似され、三角形ポリゴン P_{abc} が三角形ポリゴン P_{abc}' に近似されるとすると、近似後の三角形ポリゴン P_{abc}' を含む面がこの面の近似処理に関与する最初の格子点 a, b, c から離れていく具合を誤差として管理するようにしている。

【0056】

なお、図 6 の例では、説明の便宜上、近似処理に関与する格子点を格子点 a, b, c としたが、実際の処理では、例えば格子点 a が格子点 a' に集結されていく過程で格子点 a 以外の格子点（実測データ）が含まれているので、上述した誤差にはこれらの格子点と三角形ポリゴン P_{abc}' との距離も含まれる。

【0057】

次に、本実施形態に係るデータ削減方法に適用される誤差の評価値について説明する。

【0058】

一般に、三次元空間における平面 p は、

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0 \quad \cdots (3)$$

$$\text{但し、} A^2 + B^2 + C^2 = 1$$

の方程式で表される。

【0 0 5 9】

一方、三次元空間上の点 v の座標を (v_x, v_y, v_z) とすると、点 v と平面 p との距離 d は、

$$d = A \cdot v_x + B \cdot v_y + C \cdot v_z + D \quad \dots (4)$$

で算出され、行列式でベクトル表記すると、下記 (5) 式のようにになる。

【0 0 6 0】

【数 7】

$$d = P^T \cdot V \quad \dots (5)$$

$$\text{但し、} P = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

P^T : P の転置行列

【0 0 6 1】

従って、距離 d の 2 乗は、下記 (6) 式のようにになる。

【0 0 6 2】

【数 8】

$$d^2 = (P^T \cdot V)^2 = (P^T \cdot V) \cdot (V^T \cdot P) = P^T \cdot (V \cdot V^T) \cdot P = P^T \cdot K_V \cdot P \quad \dots (6)$$

V^T : V の転置行列

$$K_V = V \cdot V^T$$

$$= \begin{bmatrix} v_x^2 & v_x v_y & v_x v_z & v_x \\ v_x v_y & v_y^2 & v_y v_z & v_y \\ v_x v_z & v_y v_z & v_z^2 & v_z \\ v_x & v_y & v_z & 1 \end{bmatrix}$$

【 0 0 6 3 】

上記（６）式は、１つの平面 p とこの平面 p に含まれない１個の点 v との距離 d の２乗を示すものであるが、平面 p に対して複数個の点 v_1, v_2, \dots, v_m がある場合、これらの点 v_i ($i = 1, 2, \dots, m$) との距離の２乗和 $\Delta(p)$ は、下記（７）式のようになる。

【 0 0 6 4 】

【数 9】

$$\Delta(p) = \sum_{i=1}^m d_i^2 = \sum_{i=1}^m (P^T \cdot K v_i \cdot P) = P^T \cdot \sum_{i=1}^m K v_i \cdot P \quad \dots (7)$$

【 0 0 6 5 】

本実施形態に係るデータ削減方法においては、例えばエッジ収縮によりデータ削減をする場合、あるエッジの収縮によって影響を受けるポリゴンモデルの平面が n 枚あるとする場合、それらの平面の全てについて、各平面とその平面への近似化のためにデータ削減処理に関与した複数個の最初の格子点（元の三次元形状データ）との距離の離れ具合を評価するようにしているので、各平面毎に上記（７）式によって算出される距離の２乗和 $\Delta(p)$ を算出し、これらの総和をデータ削減処理に関与した全ての格子点の総数 M で除した、下記（８）式で示される ε を誤差の評価値としている。

【 0 0 6 6 】

【数 1 0】

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta(p_i)}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta(p_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \dots (8)$$

【 0 0 6 7 】

なお、上記（８）式において、 $\Delta(p_i)$ は、 i 番目の平面 p_i に対する当該平面 p_i の近似化に寄与した全ての最初の格子点との距離の２乗和であり、 m_i はそ

の距離の 2 乗和における項数である。

【0 0 6 8】

また、上記 (8) 式の演算処理においては、行列 $K v_i$ は上記 (6) 式で示したように対称行列となるので、最初の格子点 v_i について算出される行列 $K v_i$ は、対角元素とその対角元素より上側の元素とをメモリに記憶させるようにするとよい。このようにすれば、演算処理に必要なメモリ容量を低減することができる。また、上記 (8) 式の分子の各要素 m_i は i 番目の近似面 p_i における距離の 2 乗和の項数であるが、行列 $K v$ の右下隅の元素は常に「1」であり、この距離の 2 乗和の演算結果における行列 $\Sigma K v$ の右下隅の元素は m_i となるから、この元素の値を利用して上記 (8) 式の演算を行うようにするとよい。このようにすれば、改めて項数 m_i を算出する必要がなく、演算処理が容易となる。

【0 0 6 9】

なお、上記 (7) 式をある平面 p に対する誤差の評価に適用した場合、当該平面 p に至るエッジ収縮もしくは面収縮の処理過程で関与した最初の格子点 v_i が特定されると、それらの格子点 v_i の三次元形状データから得られる行列 $K v_i$ を加算した $\Sigma K v_i$ はそのエッジ収縮もしくは面収縮における誤差の程度が示すパラメータとなる。そこで、以下の説明ではこの $\Sigma K v_i$ を誤差行列と呼ぶ。

【0 0 7 0】

次に、三次元形状データのデータ削減処理の手順について、図 7 のフローチャートを用いて説明する。

【0 0 7 1】

三次元形状計測装置 1 により取り込まれた測定対象物 G の三次元形状データは、形状データ処理装置 3 に入力され、まず、ポリゴン生成部 3 1 で三角形のポリゴンモデルが生成される (# 1)。また、操作者により許容値入力部 3 3 からエッジ収縮処理の可否を判定するための許容値が入力される (# 3)。

【0 0 7 2】

続いて、評価値演算部 3 2 1 で最初のポリゴンモデルの全エッジについてエッジ収縮した場合の評価値 ε_j ($j = 1, 2, \dots, N$, N はエッジ総数) が上記 (8) 式により算出される (# 5)。例えば図 4 の例では、エッジ $E d_{1r}$ ($r = 2 \sim$

5, 9, 10)、 Ed_{2s} ($s = 5, 6, \dots, 9$)、 Ed_{tt+1} ($t = 3, 4, \dots, 10$ 、但し、 $t+1=11$ は $t+1=3$ とする。)についてエッジ収縮した場合の評価値 ε_j ($j = 1, 2, \dots, 19$)が算出される。

【0073】

このとき、例えば格子点 v_1, v_2 を格子点 v_1' に集結してエッジ Ed_{12} を収縮した場合、最初の面は全て変形し、格子点 v_1' とエッジ収縮に関係しない格子点 $v_3 \sim v_{10}$ とによって8枚の平面面 p_1, p_2, \dots, p_{10} （以下、変形後の平面を近似面という。）が形成されるが、これらの近似面 p_k ($k = 1, 2, \dots, 8$)についてそれぞれ距離の2乗和 $\Delta(p_k)$ ($k = 1, 2, \dots, 8$)が算出されるとともに、これらの距離の2乗和 $\Delta(p_k)$ 全体に含まれる要素の総数 M が算出され、上記(8)式によりエッジ Ed_{12} の収縮処理における評価値 $\varepsilon(Ed_{12})$ が算出される。なお、評価値 $\varepsilon(Ed_{12})$ は下記(9)式のようになる。

【0074】

【数11】

$$\varepsilon(Ed_{12}) = \frac{\{\Delta(p_1) + \Delta(p_2) + \dots + \Delta(p_8)\}}{(m_1 + m_2 + \dots + m_8)} \quad \dots (9)$$

【0075】

このとき、例えば平面 p_1 は格子点 v_1', v_3, v_4 によって構成されるが、格子点 v_1, v_2, v_3, v_4 が実測データである場合はエッジ収縮に関与した格子点は v_1, v_2 だけであるから、距離の2乗和 $\Delta(p_1)$ はこれらの格子点 v_1, v_2 についての誤差行列($Kv_1 + Kv_2$)を用いて上記(7)式により算出される。この状態で格子点 v_1' が更に他の格子点 v_m （図示しない実測データ）とともに格子点 v_1'' （図示していない）に集結されて近似面 p_1 が近似面 p_1' （図示していない）に近似された場合、この近似面 p_1' に至るエッジ収縮に関与した格子点は v_1, v_2, v_m となるから、距離の2乗和 $\Delta(p_1')$ はこれらの格子点 v_1, v_2, v_m についての誤差行列($Kv_1 + Kv_2 + Kv_m$)を用いて上記(7)式により算出されることになる。

【0076】

この2回目のエッジ収縮では、実質的に格子点 v_1' の誤差行列 $K v_1'$ を $(K v_1 + K v_2)$ として格子点 v_1' の誤差行列 $K v_1'$ と格子点 v_m の誤差行列 $K v_m$ とで上記(7)式により距離の2乗和 $\Delta(p_1')$ を算出することになる。

【0077】

従って、エッジ収縮処理の過程における一般論では、図4において、格子点 v_1' , v_2' , v_3' , v_4' を実測データでなく、エッジ収縮によって生成されたデータであるとすれば、各格子点 v_1' , v_2' , v_3' , v_4' に対する誤差行列をそれぞれ $K v_1'$, $K v_2'$, $K v_3'$, $K v_4'$ とすると、近似面 p_1 を構成する格子点 v_1' に対する誤差行列 $K v_1'$ を $K v_1' = K v_1 + K v_2$ とし、近似面 p_1 を構成する3個の格子点 v_1' , v_3' , v_4' の誤差行列 $K v_1'$, $K v_3'$, $K v_4'$ を加算して得られる誤差行列 $K_{p1} (= K v_1' + K v_3' + K v_4' = K v_1 + K v_2 + K v_3 + K v_4)$ を用いて上記(7)式により近似面 p_1 について距離の2乗和 $\Delta(p_1)$ が算出される。

【0078】

なお、距離の2乗和 $\Delta(p_1)$ の算出式は、

$$\Delta(p_1) = P_1^T \cdot K_{p1} \cdot P_1 \quad \cdots (10)$$

となる。ここに、 P_1 は近似面 p_1 の列ベクトル表記、 m_1 は誤差行列 K_{p1} に含まれる誤差行列 $K v$ の総数である。

【0079】

そして、近似面 p_2 , p_3 , \cdots , p_8 についても上述した近似面 p_1 と同様の方法で距離の2乗和 $\Delta(p_2)$, $\Delta(p_3)$, \cdots , $\Delta(p_8)$ が算出され、これらを上記

(9)式に代入してエッジ $E d_{12}$ の収縮における誤差評価値 $\varepsilon(E d_{12})$ が算出される。

【0080】

そして、同様の方法で他のエッジ $E d_{1r}$, $E d_{2s}$, $E d_{tt+1}$ についてもエッジ収縮をした場合の誤差評価値 $\varepsilon(E d_{1r})$, $\varepsilon(E d_{2s})$, $\varepsilon(E d_{tt+1})$ が算出される。

【0081】

続いて、評価値ソート部322で誤差評価値 ε_j のソーティングが行われ(#7)、最小の評価値 $\text{Min}\{\varepsilon_j\}$ がステップ#3で入力された許容値以下であ

るか否かが判別される（＃ 9）。最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ が許容値よりも大きければ（＃ 9でNO）、全てのエッジについてエッジ収縮した場合の形状変化が許容できない程大きいので、エッジ収縮によるデータ削減処理を終了する。一方、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ が許容値以下であれば（＃ 9でYES）、エッジ／面収縮処理部 3 2 3 でその最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ に対応するエッジの収縮処理が行われる（＃ 1 1）。例えば図 4 において、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ が $\varepsilon_{Ed_{12}}$ であれば、同図に示すようにエッジ Ed_{12} の収縮処理が行われる。

【 0 0 8 2 】

続いて、エッジ収縮後のポリゴンモデルについて当該エッジ収縮処理の影響を受けたエッジについて再度、誤差評価値 ε_q ($q = 1, 2, \dots$) が算出された後（＃ 1 3）、ステップ＃ 7 に戻り、これらの誤差評価値 ε_q のうち、最小の誤差評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ が算出され、それに対応するエッジの収縮処理が行われる（＃ 7 ～＃ 1 1）。以下、1 本ずつエッジ収縮処理を繰り返し（＃ 7 ～＃ 1 3 のループ）、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ が許容値より大きくなった時点でデータ削減処理を終了する（＃ 9でNO）。

【 0 0 8 3 】

従って、このようなデータ削減処理を行うことにより、データ削減後のポリゴンモデルは、最初のポリゴンモデルに対して最初の計測データに対する誤差評価値 ε が許容値以下となるように近似化される。

【 0 0 8 4 】

上記のように本実施の形態にかかるデータ削減方法では、エッジ収縮もしくは面収縮により近似化されるポリゴンモデルの面が最初の格子点（計測された三次元形状データ）に対してどの程度の離れ具合となるかを誤差の評価値としているので、直感的にも解り易い評価基準でデータ削減処理を行うことができる。

【 0 0 8 5 】

また、その評価値が所定の許容誤差範囲内となるようにデータ削減を行うようにしているので、近似後のポリゴンモデルを構成する三次元形状データの誤差を比較的正確に管理しつつデータ削減処理を高速に行うことができる。

【 0 0 8 6 】

特に、計測された三次元形状データにランダムなノイズのデータが混入した場合や多数の格子点を 1 点に集結してデータ削減を行う場合にも誤差評価値の信頼性の低下を抑えることができる。

【0087】

図 8 及び図 9 は、計測された三次元形状データにランダムなノイズのデータが混入した場合の誤差評価方法を従来の誤差評価方法と比較したものである。

【0088】

図 8 は、ランダムなノイズのデータによってポリゴンモデルに不連続面が生じている部分（断面で表示している。）のエッジ収縮を示す図である。同図に示すように、ポリゴンモデル表面の不連続な凸凹が大きく生じている部分の格子点 v_1 , v_2 を略中心の格子点 v_1' に集結した場合、上記従来の論文「Surface Simplification Using Quadric Error Metrics」に示されるデータ削減方法では、図 9 に示すように格子点 v_1' から、例えば格子点 v_1 , v_4 を含む面 p_{14} と格子点 v_2 , v_5 を含む面 p_{25} への距離 d_1' , d_2' を誤差評価の基礎としているので、感覚的な近似誤差に対して誤差評価値は小さい目に算出されるのに対し、本実施形態に係るデータ削減方法では、例えば格子点 v_1 , v_2 からの格子点 v_1' , v_4 , v_5 を含む平面 p_{45} への距離 d_1 , d_2 を誤差評価の基礎としているので、誤差評価値は感覚的な近似誤差に比較的合致し、小さい目に算出されることはない。

【0089】

図 10、図 11 及び図 12 は、多数の格子点を 1 点に集結した場合の誤差評価方法を従来の誤差評価方法と比較したものである。

【0090】

図 10 は、8 個の格子点 v_1 , v_2 , \dots , v_8 でジグザグな面（断面で表示している。）が形成されているポリゴンモデルの当該ジグザグ面の収縮を示す図である。同図に示すように、格子点 v_1 , v_2 , \dots , v_6 を格子点 v_7 , v_8 の略中心の格子点 v_1' に集結した場合、上記従来の論文「Surface Simplification Using Quadric Error Metrics」に示されるデータ削減方法では、図 11 に示すように格子点 v_1' から最初のポリゴンモデルのジグザグな各面 p_{71} , p_{12} , p_{23} , p_3

4, p_{45} , p_{56} , p_{68} への距離 d_1' , d_2' , \dots , d_6' を誤差評価の基礎としているので、感覚的な近似誤差に対して誤差の評価値は大きい目に算出されるのに対し、本実施形態に係るデータ削減方法では、例えば各格子点 v_1 , v_2 , \dots , v_6 からの格子点 v_1' , v_7 , v_8 を含む平面 p_{78} への距離 d_1 , d_2 , \dots , d_6 を誤差評価の基礎としているので、誤差の評価値は感覚的な近似誤差に比較的合致し、大きい目に算出されることはない。

【0091】

図13は、三次元形状データのデータ削減処理手順の変形例を示すフローチャートである。

【0092】

図7に示すデータ削減処理手順では、エッジ収縮処理を行う毎にそのエッジ収縮により影響を受けたエッジについて再度、評価値 ε を算出し、その評価値 ε に基づいて次のエッジ収縮処理を行うようにしていたが、図13に示すデータ削減処理手順は、エッジ収縮により影響を受けたエッジについての評価値 ε の演算を行わず、それ以外のエッジについてエッジ収縮を行うようにしたものである。

【0093】

具体的には、図13に示すフローチャートは、図7において、ステップ#13の処理を「エッジ収縮により影響を受けたエッジの収縮を禁止する」処理のステップ#13'に変更し、ステップ#9と「終了」の処理の間にステップ#15, #17の処理を追加したものである。

【0094】

そこで、以下の説明ではフローチャートの共通部分については簡単に説明し、異なる部分について詳細に説明する。

【0095】

三次元形状計測装置1により取り込まれた測定対象物Gの三次元形状データは、形状データ処理装置3に入力され、ポリゴン生成部31で三角形のポリゴンモデルが生成される(#1)。また、操作者により許容値入力部33からエッジ収縮処理の可否を判定するための許容値が入力される(#3)。

【0096】

続いて、評価値演算部 3 2 1 でポリゴンモデルの全エッジについてエッジ収縮した場合の評価値 ε_j ($j = 1, 2, \dots, N$, N はエッジ総数) が算出され (# 5)、評価値ソート部 3 2 2 で誤差評価値 ε_j のソーティングが行われて最小の評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ が算出される (# 7)。

【0 0 9 7】

続いて、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ がステップ # 3 で許容値以下であるか否かが判別され (# 9)、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ が許容値以下であれば (# 9 で YES)、エッジ/面収縮処理部 3 2 3 でその最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ に対応するエッジの収縮処理が行われる (# 1 1)。

【0 0 9 8】

続いて、このエッジ収縮処理で影響を受けたエッジの収縮処理が禁止され (# 1 3')、ステップ # 7 に戻る。この処理は、次のエッジ収縮処理を今回のエッジ収縮処理で影響を受けなかったエッジについて行うようにするためのものである。

【0 0 9 9】

ステップ # 7 に戻ると、エッジ収縮が禁止されたエッジ以外のエッジに対する評価値 ε_q ($q = 1, 2, \dots, Q$ 。但し、 $Q < N$) についてソーティングが行われ、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ が算出される (# 7)。そして、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ が許容値以下であるか否かが判別され (# 9)、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ が許容値以下であれば (# 9 で YES)、エッジ/面収縮処理部 3 2 3 でその最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ に対応するエッジの収縮処理が行われ (# 1 1)、更にこのエッジ収縮処理で影響を受けたエッジの収縮処理が禁止され (# 1 3')、再度、ステップ # 7 に戻る。

【0 1 0 0】

そして、以下、同様の処理を繰り返し、エッジ収縮処理を行う毎にそのエッジ収縮で影響を受けたエッジを除外しつつ次のエッジ処理処理が行なわれる (# 7, # 9, # 1 1, # 1 3' のループ)。

【0 1 0 1】

一方、上記エッジ収縮処理を繰り返す過程で、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ が許

容値よりも大きいと（# 9 で NO）、エッジ収縮が禁止されたエッジがあるか否かが判別され（# 1 5）、エッジ収縮が禁止されたエッジがあれば（# 1 5 で YES）、それらのエッジについて再度、誤差評価値 ε_r ($r = 1, 2, \dots$) が算出された後（# 1 7）、ステップ # 7 に戻り、これらの誤差評価値 ε_r のうち、最小誤差評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_r \}$ が算出され、その最小誤差評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_r \}$ に対応するエッジの収縮処理が行われる（# 7, # 9, # 1 1）。

【0 1 0 2】

そして、上記エッジ収縮処理を繰り返し、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ が許容値よりも大きくなるとともに、エッジ収縮が禁止されたエッジもなくなると（# 9, # 1 5 で NO）、エッジ収縮によるデータ削減処理を終了する。

【0 1 0 3】

図 1 4 は、図 1 3 に示す処理手順によるデータ削減プロセスの一例を示す図である。

【0 1 0 4】

同図において、ポリゴンモデル M_0 は最初のポリゴンモデルである。このポリゴンモデル M_0 は 2 8 個の格子点 v_1, v_2, \dots, v_{28} を各行の個数が (3, 4, 5, 4, 5, 4, 3) 個となるように 5 行に配列し、隣り合う格子点間を結んだものである。

【0 1 0 5】

エッジ e_1, e_2, e_3, e_4, e_5 は、各エッジ e_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) を収縮させた場合、互いにその影響を受けない関係にあるから、説明の便宜上、図 1 3 に示す処理手順によって順次、エッジ収縮されるものとして選択したものである。

【0 1 0 6】

従って、図 1 4 のデータ削減プロセスは、図 1 3 の処理手順によってポリゴンモデル M_0 がエッジ e_1, e_2, \dots, e_5 の順に順次、エッジ収縮される場合を示している。そして、ポリゴンモデル M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 は、ポリゴンモデル M_0 をエッジ e_1, e_2, \dots, e_5 の順に収縮処理したときの近似化されたポリゴンモデルである。

【0 1 0 7】

上述した図 1 3 に示すデータ削減処理手順によれば、まず、最初のエッジ収縮処理でエッジ e_1 が収縮されてポリゴンモデル M_1 に近似化されると、集結された格子点 v_a とその周囲に配置される格子点 $v_9, v_{10}, v_{11}, v_{13}, v_{16}, v_{18}, v_{19}, v_{20}$ (ポリゴンモデル M_1 の点線枠内の格子点) とで形成されるエッジが影響を受けることになるため、次のエッジ収縮処理では、これらのエッジを除外したエッジ (ポリゴンモデル M_1 の点線枠の外にあるエッジ) について再度、評価値 ε_q のソーティングが行なわれ、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_q \}$ を有するエッジ e_2 についてエッジ収縮処理が行われてポリゴンモデル M_2 に近似化される。

【0 1 0 8】

更に、次のエッジ収縮処理では、集結された格子点 v_b とその周囲に配置される格子点 $v_1, v_2, v_4, v_6, v_8, v_{10}, v_{13}, v_a$ (ポリゴンモデル M_2 の点線枠内の格子点) とで形成されるエッジが影響を受けることになるため、これらのエッジを除外したエッジ (ポリゴンモデル M_2 の点線枠の外にあるエッジ) について再度、評価値 ε_s のソーティングが行なわれ、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_s \}$ を有するエッジ e_3 についてエッジ収縮処理が行われてポリゴンモデル M_3 に近似化される。

【0 1 0 9】

そして、以下同様の方法でエッジ e_4, e_5 についてもエッジ収縮が行なわれ、この 5 回のエッジ収縮処理により最初のポリゴンモデル M_0 はポリゴンモデル M_5 に近似化され、データ数は 5 個削減される。

【0 1 1 0】

最初のポリゴンモデル M_0 を 6 枚目のポリゴンモデル M_6 (図示せず。) まで近似化するプロセスを考えると、図 1 3 に示す処理手順ではエッジ収縮によって影響を受けたエッジについては評価値の再計算をしないので、図 1 4 の例では、最初のポリゴンモデル M_0 を構成する 66 本のエッジについて最初に評価値が計算されると、近似化されたポリゴンモデル $M_1 \sim M_4$ については評価値の再計算は行なわれず、次の再計算はポリゴンモデル M_5 を構成する 50 本のエッジについて行なわれることになる。従って、6 枚目のポリゴンモデル M_6 までの評価値の再

計算回数は50回となる。

【0111】

一方、図7に示す処理手順ではエッジ収縮によって影響を受けたエッジについて評価値の再計算を行っているので、近似化された各ポリゴンモデル $M_1 \sim M_5$ 毎にエッジ収縮によって影響を受ける16本のエッジについて評価値の再計算をすることになる。従って、図7に示す処理手順では、6枚目のポリゴンモデル M_6 までの評価値の再計算回数は $16 \times 5 = 80$ 回となり、図13に示す処理手順の方が評価値の再計算回数が少なくなり、高速処理が可能になるという利点がある。

【0112】

図15は、図13に示すフローチャートの変形例である。

【0113】

図15に示すフローチャートは、エッジ収縮後に影響を受けたエッジの評価値を許容値よりも大きい所定の評価値 ε_{\max} に置換することにより次のエッジ収縮ではそのエッジを実質的にエッジ収縮の対象外となるようにしたものである。

【0114】

具体的には、図13のフローチャートにおいて、ステップ#13'を「エッジ収縮により影響を受けたエッジの評価値を ε_{\max} に設定する」処理のステップ#13"に変更するとともに、ステップ#15の判定対象及びステップ#17の評価値再計算の対象を「評価値が ε_{\max} のエッジ」に変更し、ステップ#17'の後に評価値再計算後のエッジに対するエッジ収縮処理を行うステップ#19、#21の処理を追加したものである。

【0115】

そこで、以下の説明では図13のフローチャートと異なる部分について詳細に説明する。

【0116】

ステップ#11でエッジ/面収縮処理部323により最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_j \}$ に対応するエッジの収縮処理が行われると、このエッジ収縮処理で影響を受けたエッジの評価値が許容値よりも大きい所定の評価値 ε_{\max} に設定され（#13

”)、ステップ # 7 に戻る。この処理は、これらのエッジが次のエッジ収縮処理で対象外となるようにする、すなわち、エッジ収縮処理で影響を受けなかったエッジについてのみエッジ収縮が行なわれるようにするためのものである。

【0 1 1 7】

ステップ # 7 に戻ると、再度、評価値 ε_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$) のソーティングが行われ、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_i \}$ が算出される (# 7)。そして、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_i \}$ が許容値以下であるか否かが判別され (# 9)、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_i \}$ が許容値以下であれば (# 9 で Y E S)、エッジ/面収縮処理部 3 2 3 でその最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_i \}$ に対応するエッジの収縮処理が行われる (# 1 1)。

【0 1 1 8】

続いて、このエッジ収縮処理で影響を受けたエッジの評価値が評価値 ε_{\max} に設定され (# 1 3”)、再度、ステップ # 7 に戻る。以下、同様の処理を繰り返し、エッジ収縮処理を行う毎にそのエッジ収縮で影響を受けたエッジの評価値を評価値 ε_{\max} に設定しつつ次のエッジ処理処理が行なわれる (# 7, # 9, # 1 1, # 1 3” のループ)。

【0 1 1 9】

一方、上記エッジ収縮処理を繰り返す過程で、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_i \}$ が許容値よりも大きくなると (# 9 で N O)、評価値 ε_{\max} を有するエッジがあるか否かが判別され (# 1 5’)、評価値 ε_{\max} を有するエッジがあれば (# 1 5’ で Y E S)、それらのエッジについて再度、誤差評価値 ε_s ($s = 1, 2, \dots$) が算出される (# 1 7’)。

【0 1 2 0】

そして、ソーティングによりこれらの誤差評価値 ε_s のうち、最小の誤差評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_s \}$ が算出され (# 1 9)、その最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_i \}$ が許容値以下であれば (# 2 1 で Y E S)、ステップ # 1 1 に移行して上述したその最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_i \}$ に対応するエッジの収縮処理が行われる。

【0 1 2 1】

一方、上記エッジ収縮処理を繰り返し、評価値 ε_{\max} を有するエッジがなくな

るか（＃ 1' 5' で YES）、あるいは評価値 ε_{\max} を有するエッジについて再計算された評価値 ε_s のうち、最小評価値 $\text{Min} \{ \varepsilon_s \}$ が許容値よりも大きくなると（＃ 2 1 で NO）、エッジ収縮によるデータ削減処理を終了する。

【 0 1 2 2 】

図 1 5 に示す処理手順もエッジ収縮により影響を受けるエッジの評価値を許容値よりも大きい評価値 ε_{\max} に設定することで、実質的に図 1 3 の処理手順に示す当該エッジの収縮を禁止するようにしているので、評価値の再計算回数が低減され、高速処理が可能となる。

【 0 1 2 3 】

なお、図 1 3、図 1 5 に示すデータ削減の処理手順では、エッジ収縮処理により影響を受けた部分については、エッジ収縮処理が禁止された部分が全てなくなるまで、評価値の再計算をせず、エッジ収縮処理の対象外とするようにしているが、例えばエッジ収縮処理が所定の回数だけ繰り返されたときや評価値の最小値と許容値との差が所定の範囲内になったとき等の所定の条件が満たされると、エッジ収縮処理の禁止を解除し、全てのエッジについて評価値の再計算を行なって、再度、エッジ収縮を可能にするようにしてもよい。

【 0 1 2 4 】

このようにすれば、エッジ収縮処理が禁止された部分に許容誤差内でデータ削減処理が可能な部分が残っている場合にもその部分についてデータ削減処理が可能になり、許容範囲内で可能な限り効率良くデータ削減を行うことができる。

【 0 1 2 5 】

また、図 1 3、図 1 5 に示すデータ削減の処理手順は、評価値の再計算回数を低減し、処理速度の高速化を図るものであるもので、評価値は、上述の（ 8 ）式で示した誤差 ε に限定されるものではない。エッジ収縮もしくは面収縮により評価値が変化し、収縮後に再計算が必要となるような評価値、例えば上述の論文「Surface Simplification Using Quadric Error Metrics」に示される評価値を採用している場合にも広く適用することができる。

【 0 1 2 6 】

また、上記実施の形態では三次元形状計測装置 1 で計測された三次元計測デー

タのデータ削減を例に説明したが、本発明はこれに限定されるものではなく、コンピュータグラフィックス等で創作された三次元データについても広く適用することができる。

【0 1 2 7】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、2個以上の格子点を1個の格子点に集結してポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより当該ポリゴンモデルを構成する複数の三次元形状データのデータ数を削減する三次元形状データのデータ削減方法であって、ポリゴンモデルのエッジもしくは面を収縮することにより変形を受ける全ての面について、各面と各面の変形に関与した全ての最初の格子点との距離に基づく所定の評価値を算出し、この評価値が所定の許容値以下であるとき、エッジ収縮もしくは面収縮により三次元形状データの削減を行うようにしたので、データ削減処理において、最初の三次元形状データからの近似誤差という直感的に理解し易い評価基準で誤差管理を行うことができる。

【0 1 2 8】

また、例えばポリゴンモデルにおいて局所的に面の向きがジグザグに急変するような場合にも比較的正確に誤差を管理しつつ好適にデータ削減処理を行なうことができる。

【0 1 2 9】

特に評価値を上記(1)式で定義する誤差 ε としたので、最初の三次元形状データについて算出された誤差行列を保存しておくだけで、誤差 ε が容易に算出でき、高速処理が可能であるとともに、データ削減処理の演算に要するメモリの効率的な利用も可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明に係るデータ削減方法を適用した三次元形状計測データ処理システムの構成を示すブロック図である。

【図 2】

形状データ処理装置の構成を示すブロック図である。

【図 3】

データ削減によるポリゴンモデルの近似化の一例を示す図である。

【図 4】

エッジ収縮によるデータ削減方法の概念図である。

【図 5】

面収縮によるデータ削減方法の概念図である。

【図 6】

本実施形態に係るデータ削減方法に適用される評価値を説明するための図である。

【図 7】

三次元形状データのデータ削減処理の手順を示すフローチャートである。

【図 8】

ランダムなノイズのデータによってポリゴンモデルに不連続面が生じている部分のエッジ収縮を示す図である。

【図 9】

図 8 に示すデータ削減処理における本実施形態に係る誤差評価値と従来の誤差評価値との差異を説明するための図である。

【図 10】

ジグザグな面を有するポリゴンモデルの当該ジグザグ面の収縮を示す図である。

【図 11】

図 10 に示すデータ削減処理における従来の誤差評価値を説明するための図である。

【図 12】

図 10 に示すデータ削減処理における本実施形態に係る誤差評価値を説明するための図である。

【図 13】

三次元形状データのデータ削減処理手順の他の実施形態を示すフローチャートである。

【図 1 4】

図 1 3 に示す処理手順によるデータ削減プロセスの一例を説明するための図である。

【図 1 5】

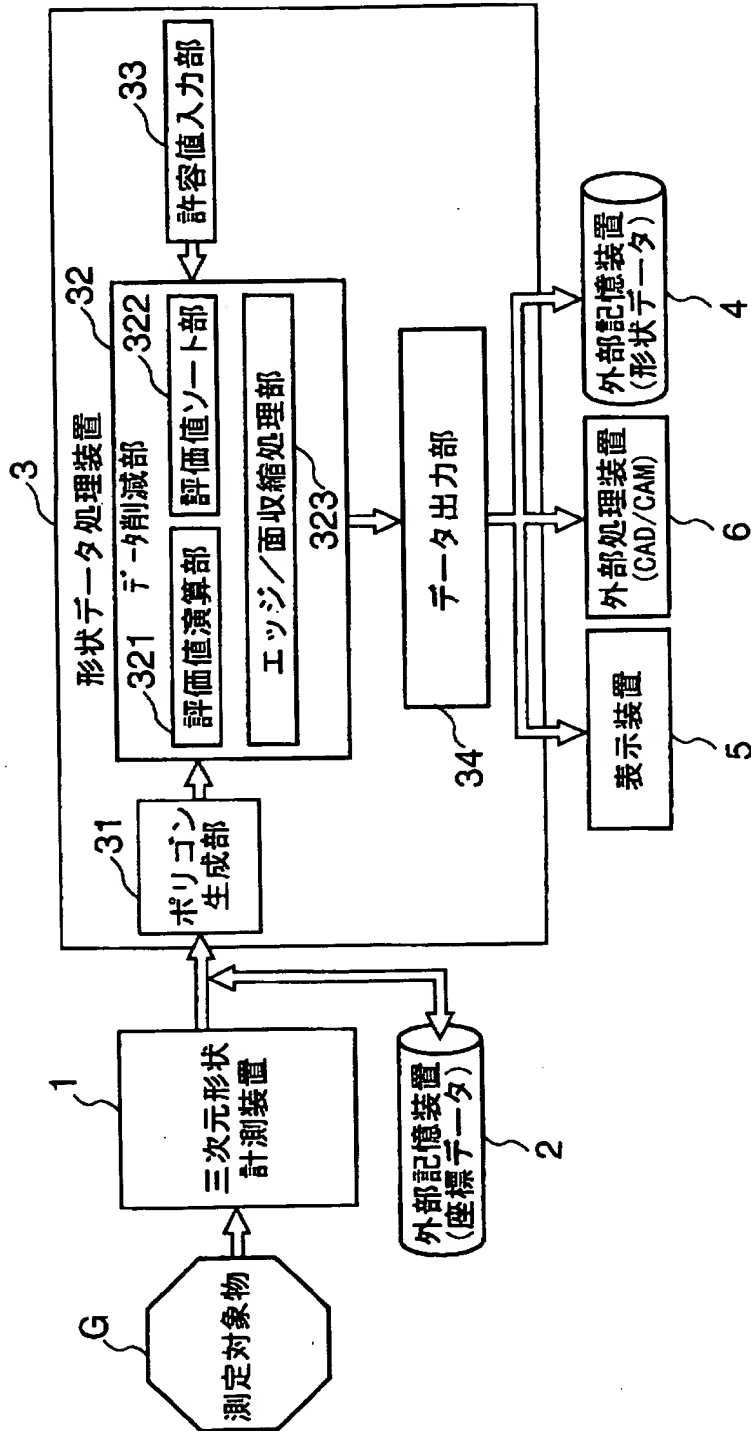
図 1 3 に示すフローチャートの変形例を示す図である。

【符号の説明】

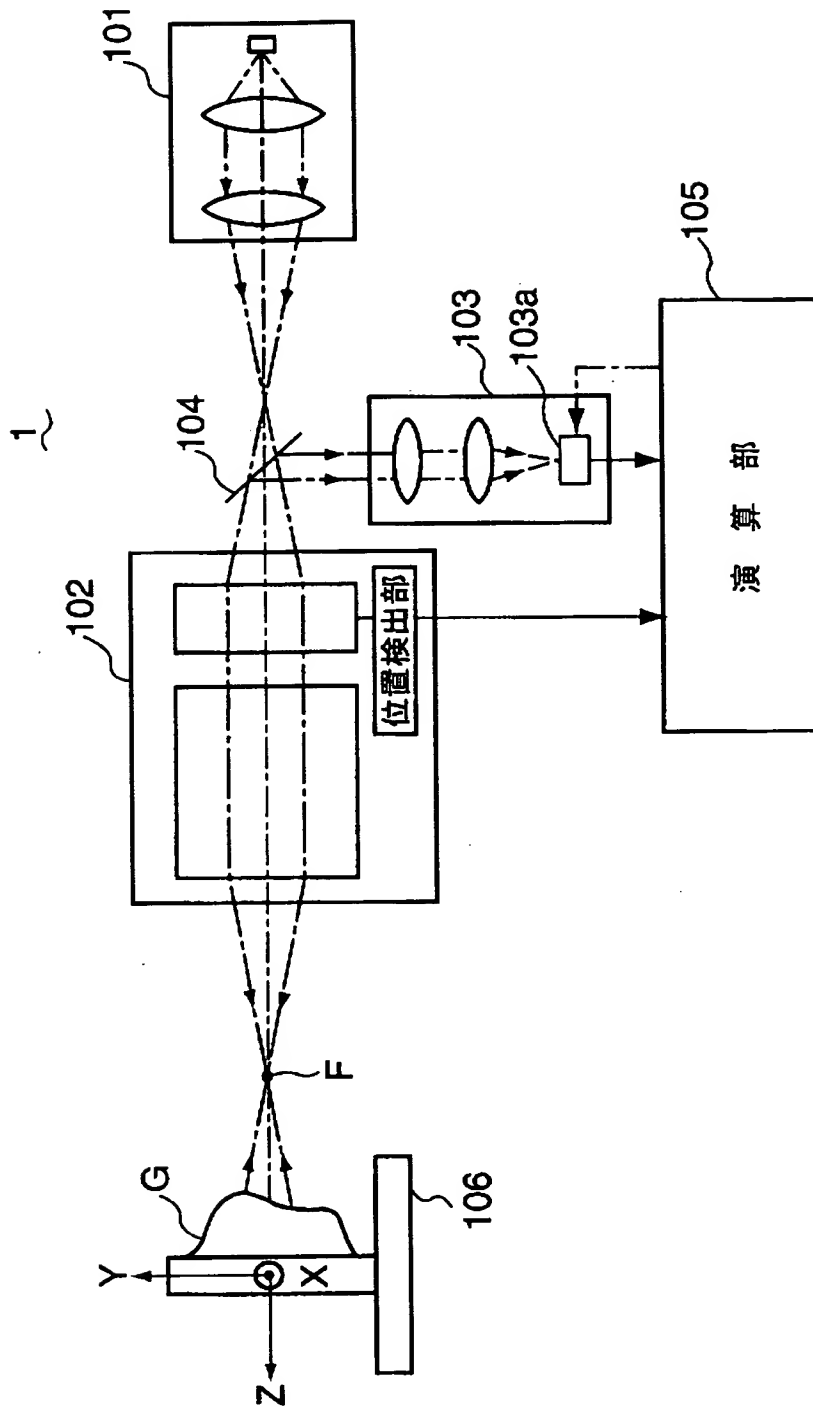
- 1 三次元形状計測装置
 - 1 0 1 照明部
 - 1 0 2 共焦点型光学系
 - 1 0 3 受光部
 - 1 0 4 ビームスプリッタ
 - 1 0 5 演算部
 - 1 0 6 測定テーブル
- 2, 4 外部記憶装置
- 3 形状データ処理装置（データ削減装置）
 - 3 1 ポリゴン生成部
 - 3 2 データ削減部
 - 3 2 1 評価値演算部（評価値算出手段）
 - 3 2 2 評価値ソート部
 - 3 2 3 エッジ／面収縮処理部（比較手段、データ削減手段）
 - 3 3 許容値入力部
 - 3 4 データ出力部
- 5 表示装置
- 6 外部処理装置

【書類名】 図面

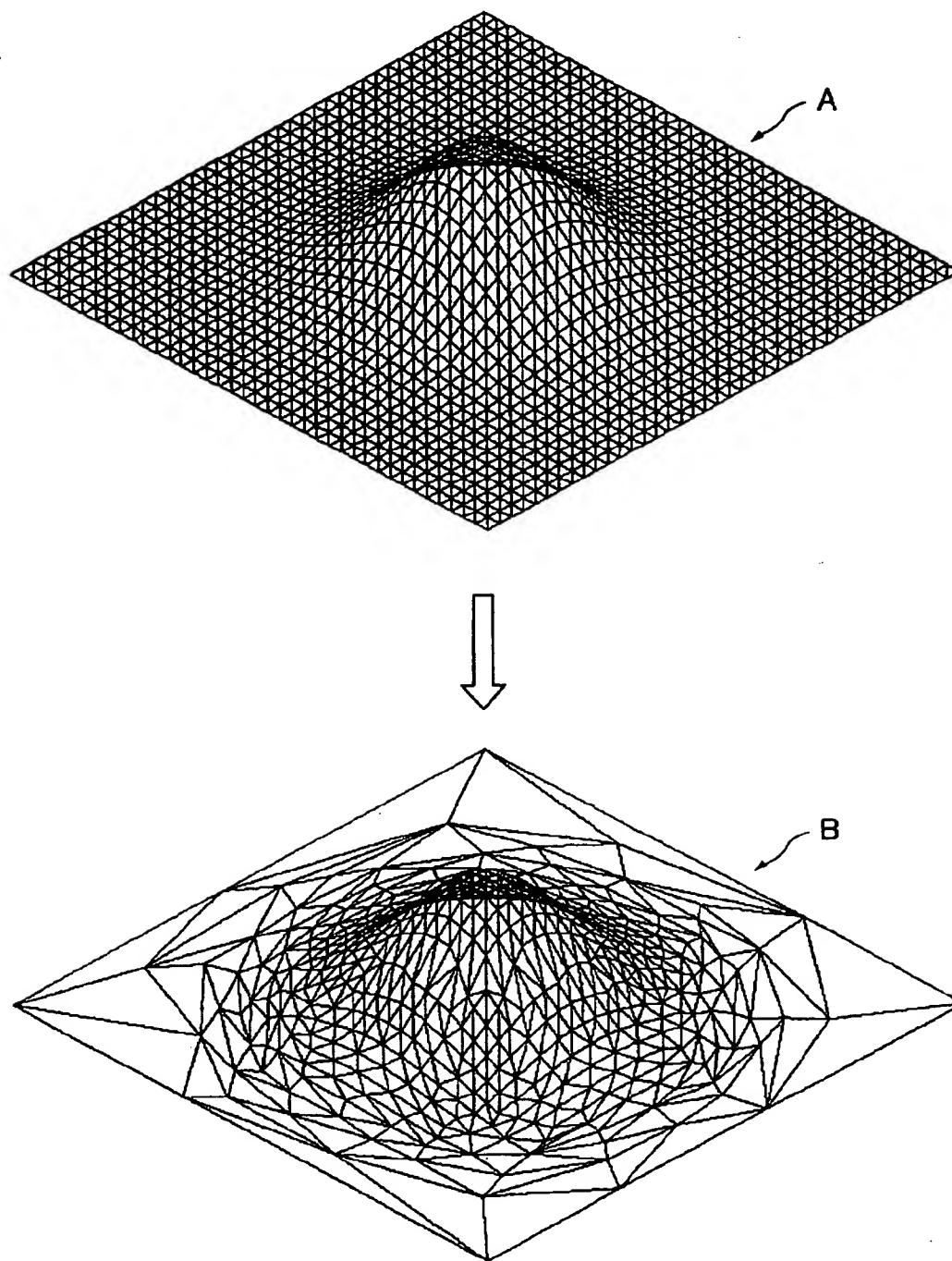
【図 1】



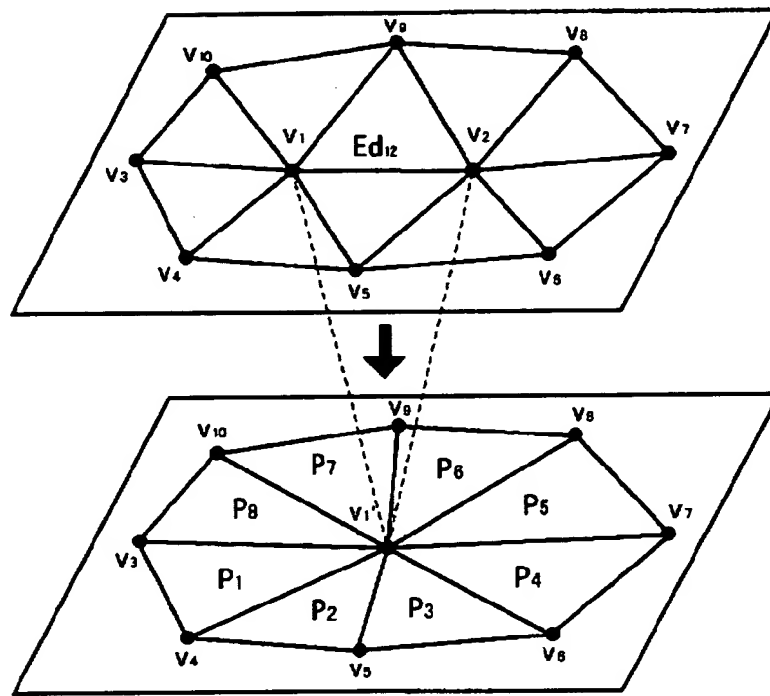
【図 2】



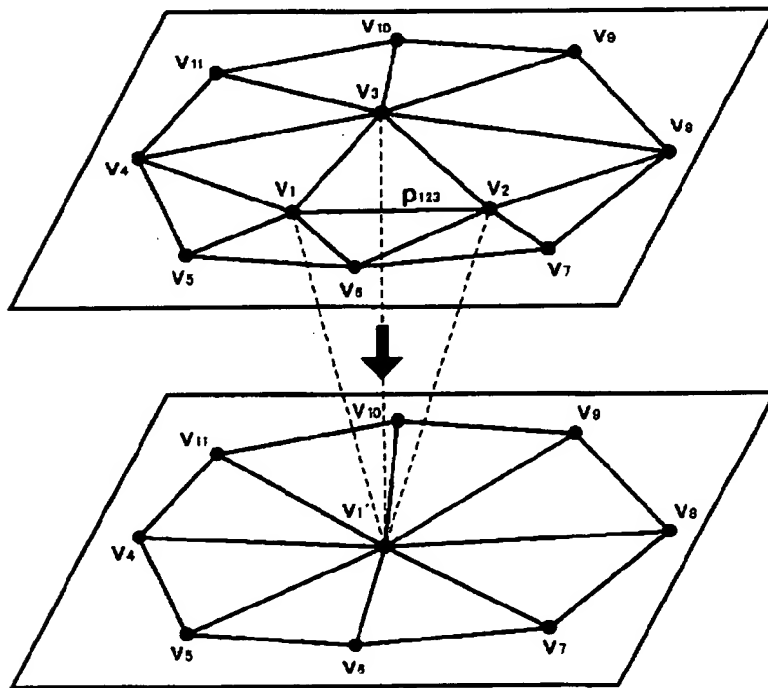
【図 3】



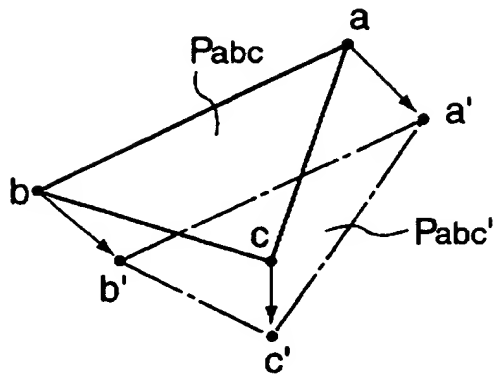
【図 4】



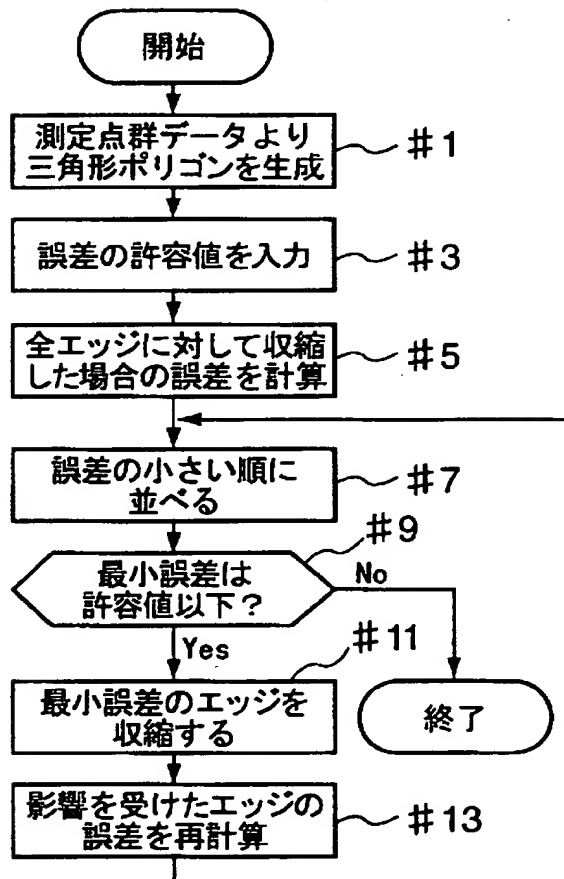
【図 5】



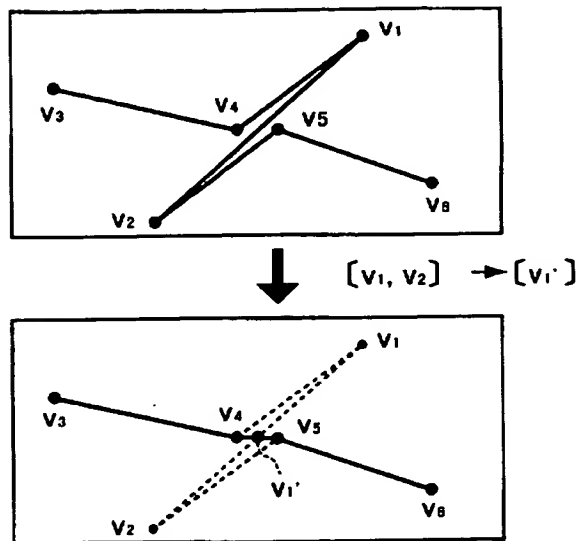
【図 6】



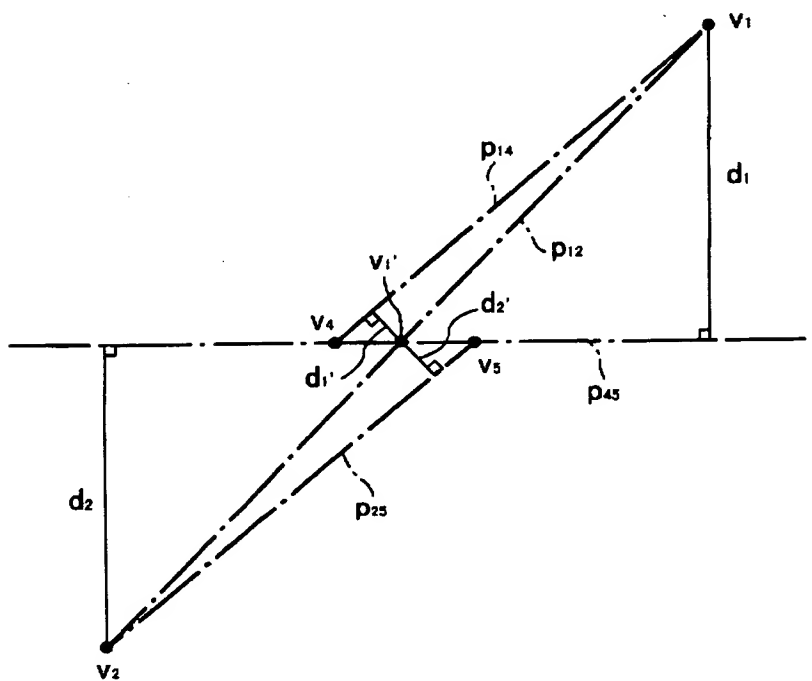
【図 7】



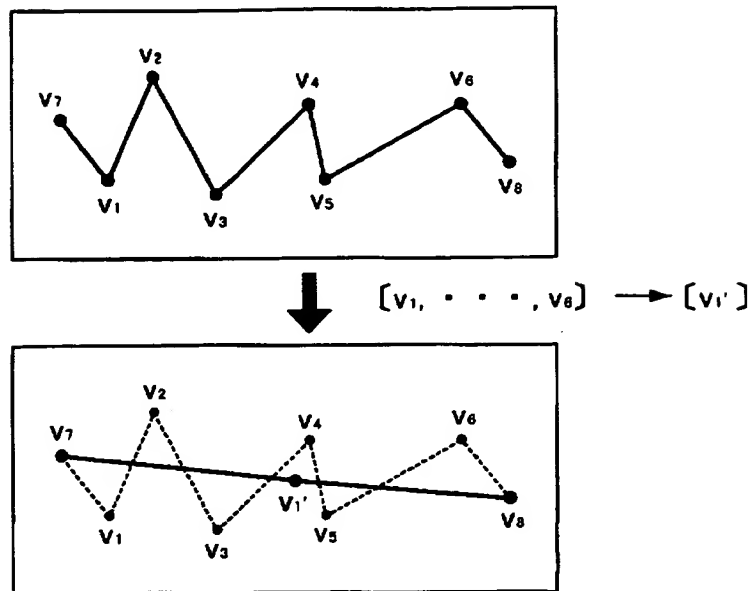
【圖 8】



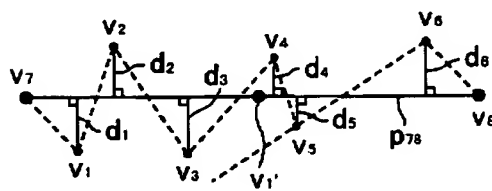
【图9】



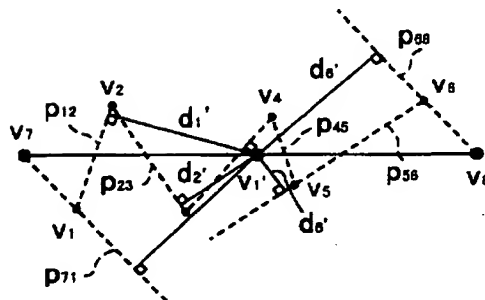
【図 1 0】



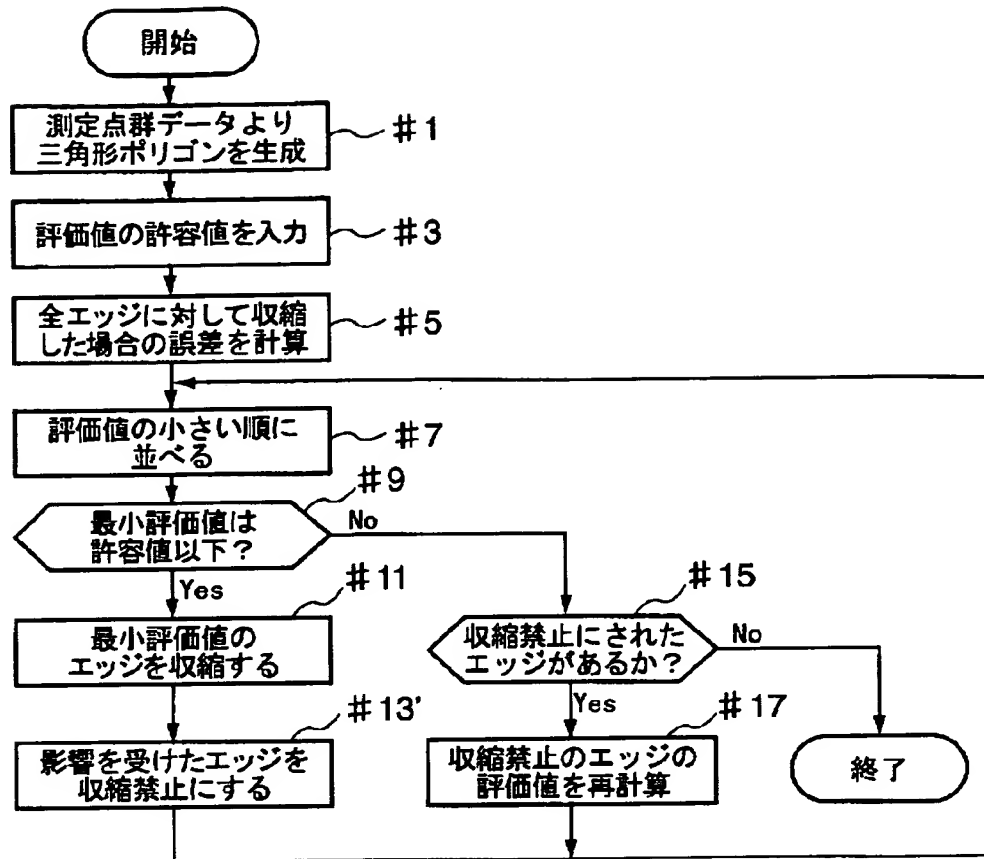
【図 1 1】



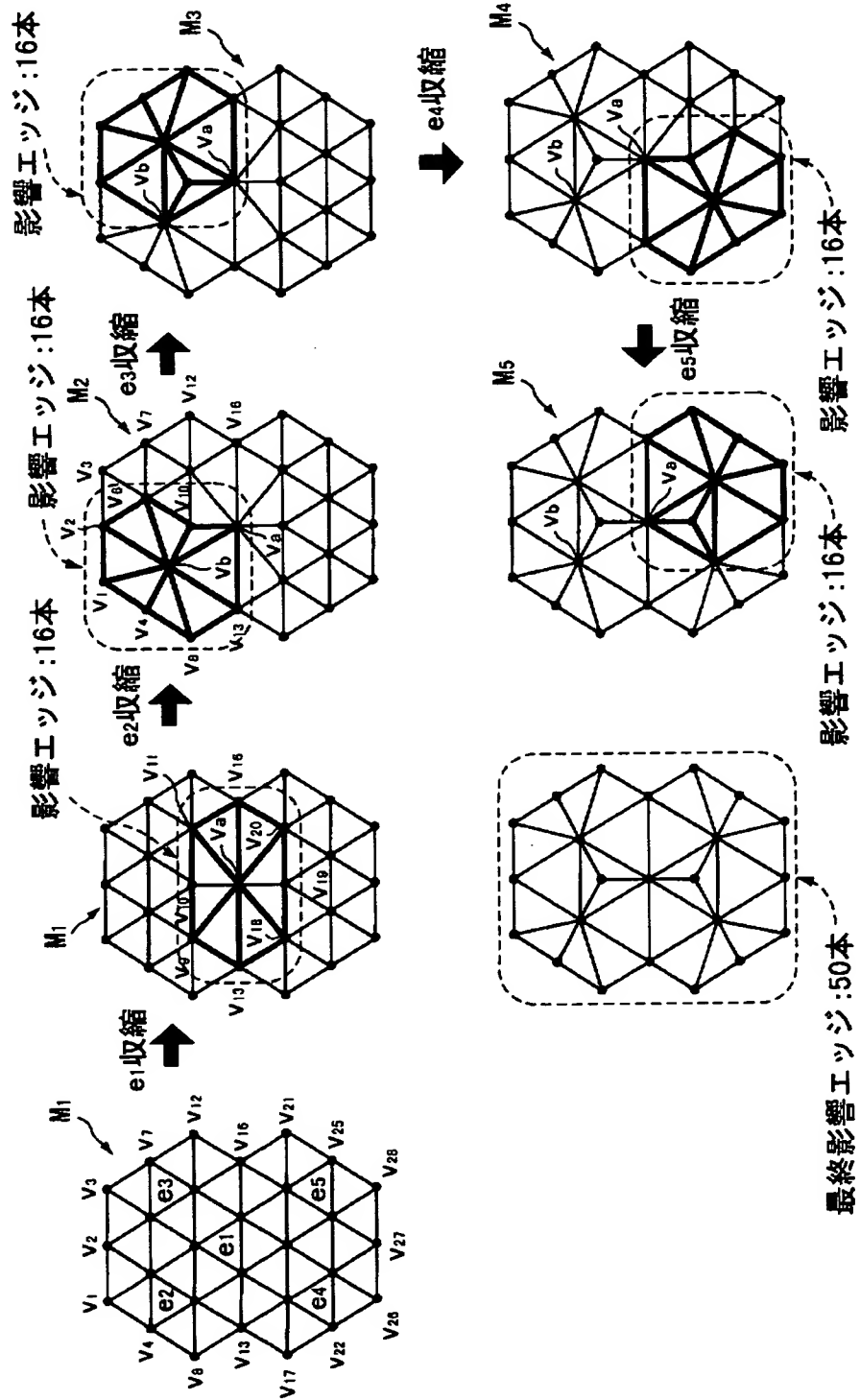
【図 1 2】



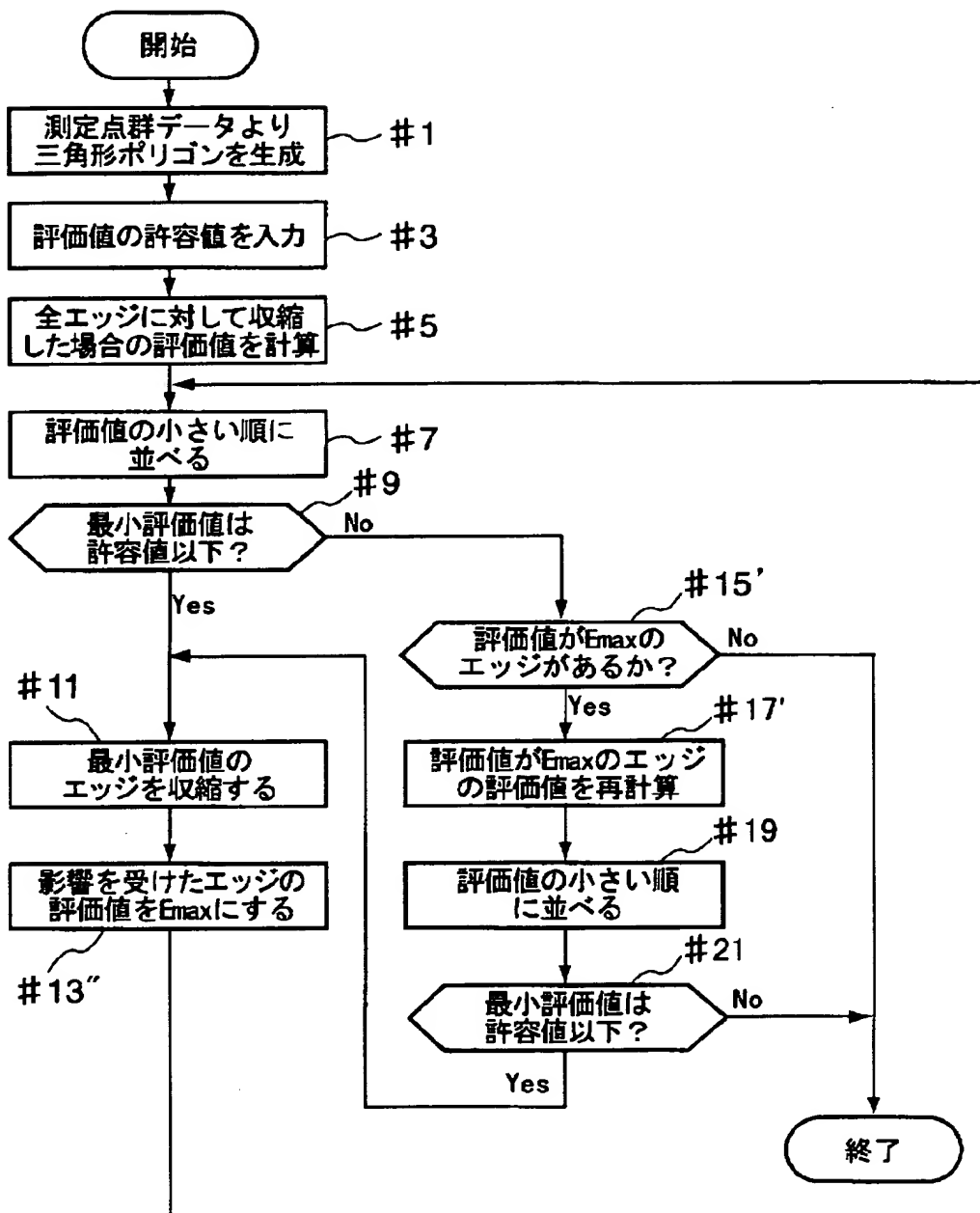
【図 13】



【図 1 4】



【図 1 5】



但し、評価値Emaxは、許容値より大きな値

【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 ポリゴンモデルにおける近似誤差を正確に管理して計測された三次元形状データのデータ数を効率よく削減する。

【解決手段】 三次元形状計測装置 1 で計測された三次元形状データは 2 個以上のデータを 1 個のデータに集結してポリゴンモデルのエッジを収縮することによりデータ数が削減される。評価値演算部 3 2 1 でエッジ収縮により変形を受ける全ての近似面について各面と各面の変形に関与した全ての最初の三次元形状データとの距離に基づく所定の評価値が算出され、評価値が上記許容値以下であるとき、エッジ／面収縮処理 3 2 3 でその評価値に対応するエッジ収縮が行なわれる。最初の三次元形状データに対する近似面との距離を管理することで誤差管理を比較的正確で、直感的に理解し易くした。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000006079]

1. 変更年月日	1994年 7月20日
[変更理由]	名称変更
住 所	大阪府大阪市中央区安土町二丁目3番13号 大阪国際ビル
氏 名	ミノルタ株式会社